

ELEMENTOS DE CASCA EM ALVENARIA CERÂMICA REFORÇADOS COM LAMINADOS DE FIBRAS DE CARBONO



FORTES, Adriano Silva¹, OLIVEIRA, Juliana T.² & BARROS, Joaquim A. Oliveira de²

¹CEFET-BA, R. Emídio Santos s/n CEP 40300-010, Salvador-BA, Brasil, e-mail: fortes@civil.uminho.pt

18th to 20th September 2002
Belo Horizonte, Brazil

²Departamento de Engenharia Civil da Universidade do Minho, Campus de Azurém CEP 4800-050, Guimarães - Portugal, juliana@civil.uminho.pt; barros@civil.uminho.pt

RESUMO: *Este trabalho refere-se a um estudo experimental efectuado sobre elementos de casca em alvenaria cerâmica com juntas e camada de compressão em betão simples, reforçados com laminados de CFRP para esforços de flexão. No reforço utilizaram-se duas técnicas: laminados colados sobre a superfície do betão das juntas; laminados inseridos em entalhes executados no betão das juntas. Os resultados obtidos demonstram a eficiência das técnicas de reforço utilizadas, dado se ter registado um substancial aumento da capacidade resistente e das condições de segurança dos elementos ensaiados.*

Key words: CFRP, Alvenaria, Reforço.

ABSTRACT: Shell elements made by ceramic units bonded by concrete joints and covered by a concrete compression layer were strengthening by strips of carbon fiber reinforced polymer laminates (CFRP), using two reinforcing techniques: CFRP laminates externally bonded to concrete joints, CFRP laminates bonded into slits made on the concrete joints. Both reinforcing techniques have shown to be effective in terms of increasing the ultimate load and its corresponding deformability, but the last one was more effectiveness. In the present work the experimental research is described and the main results are presented and discussed.

Key words: CFRP, Masonry, Strengthening.

1 INTRODUÇÃO

A utilização de materiais compósitos do tipo polímero reforçado com fibras (*Fiber Reinforced Polymer – FRP*) na Indústria da Construção Civil, iniciou-se pela sua aplicação em reforço de estruturas de betão armado. Recentemente, devido às manifestações patológicas causadas por abalos sísmicos, efeito de vento e variação térmica, entre outros, alguns centros de pesquisas voltaram a sua atenção para a realização de estudos sobre reforço e reabilitação de alvenaria com *Carbon Fiber Reinforced Polymer – CFRP*. A elevada resistência à tração e à fadiga, a durabilidade, o baixo peso específico e a facilidade de aplicação, são algumas das propriedades e características desses materiais compósitos que os tornam atraentes para aplicação em reforço e na reabilitação de estruturas de alvenaria. Sabe-se que a utilização da alvenaria como elemento estrutural tem aumentado gradualmente, principalmente devido ao facto da alvenaria permitir a construção de obras modernas, duráveis e económicas. Apesar das propriedades físicas e mecânicas dos materiais

compósitos, tipo *FRP*, em sua maioria, já serem conhecidas, CEB-FIP (2001), ainda são necessárias investigações com o objectivo de aumentar o conhecimento sobre o comportamento destes materiais, quando aplicados no reforço de elementos de alvenaria, nomeadamente: na capacidade resistente, na eficácia do reforço, nas deformações, nos deslocamentos, na aderência entre reforço e substrato e no controlo da qualidade na aplicação do reforço. Recentemente, estudos realizados por Vallizzi e Modena (2001) sobre arcos em alvenaria reforçados com laminados de CFRP, submetidos a cargas verticais, permitiram observar que o reforço com CFRP evita o colapso brusco da alvenaria, que é um material frágil, aumentando desta forma as condições de segurança das referidas estruturas. Neste trabalho realizam-se ensaios experimental sobre nove painéis em alvenaria cerâmica com juntas e camada de compressão de betão simples. Estes painéis são protótipos de cascas abatidas e foram divididos em três grupos de três exemplares, um grupo para servir de modelo de referência, e os outros dois para serem reforçados, um segundo a técnica de colagem do laminado de CFRP sobre a superfície do betão

das juntas, e outro em que os laminados são inseridos em entalhes executados no betão das juntas. Os resultados obtidos demonstram a eficiência das técnicas de reforço, dado se ter observado um substancial aumento da capacidade resistente e da rigidez.

2 BREVE HISTÓRICO

Como produto industrializado para construção, o tijolo cerâmico de furação surge no século XIX no início da Revolução Industrial. As características deste material, referentes ao conforto do espaço construído (isolamento acústico, isolamento térmico, impermeabilidade, resistência a intempéries, possibilidade de diversificação estética), à facilidade de aplicação (facilidade de transporte, disponibilidade de materiais, facilidade de encontrar mão-de-obra), propriedades físicas e mecânicas adequadas à construção de edificações (resistência ao fogo, capacidade resistente), permitiu uma expansão notável da alvenaria de tijolo cerâmico. A evolução e a diversificação dos modelos vêm acompanhando as exigências das técnicas construtivas. Vários trabalhos realizados pelo arquitecto Eladio Dieste, na América Latina, são magníficos exemplos da utilização do tijolo cerâmico como material para construção de cascas em alvenaria armada. Em seus trabalhos mostram-se as possibilidades de formas para diversos tipos de edificações. Estas obras vem sendo concebidas desde a década de 50, levando-se em consideração a harmonia e respeitando as tendências modernas associadas com o aspecto cultural de cada edificação. Como exemplo de coberturas em casca com curvatura dupla, tem-se a igreja de Atlántida (1959) - Uruguai, como mostram as Figuras 1 a 3. Estas figuras mostram a arrojada concepção estrutural adoptada na solução da igreja. As paredes onduladas, em projecção horizontal, são também inclinadas em elevação, servindo de sustentação para a sua cobertura, também ondulada.



Figura 1. Vista externa da Igreja Atlántida.

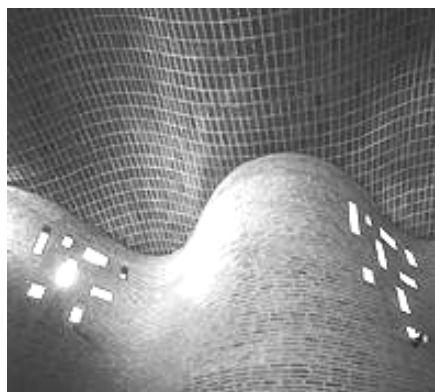


Figura 2. Vista da face inferior do teto da nave central da Igreja Atlántida.

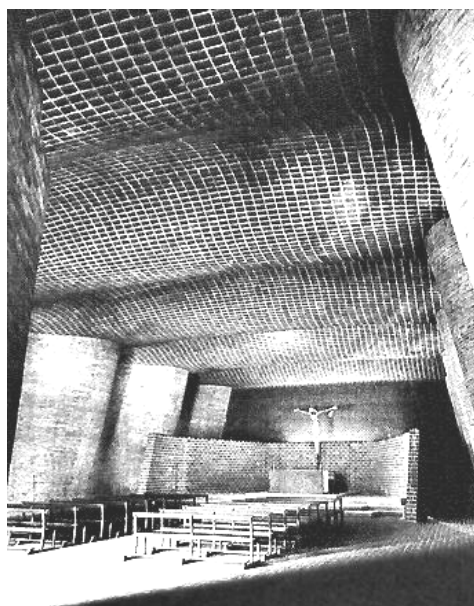


Figura 3. Vista da face inferior do teto da nave central e altar mor da Igreja Atlántida.

A Figura 4 ilustra a estrutura de um armazém com cobertura em casca abatida de alvenaria cerâmica armada, apoiada em paredes de alvenaria cerâmica.



Figura 4. Vista do interior de um armazém em alvenaria cerâmica.

A cobertura foi construída no final da década de 50 em alvenaria cerâmica, armada em duas direcções, solução estrutural inovadora para a época. Apesar desta técnica já ser utilizada desde a década de 50, praticamente de forma empírica, ainda é necessário investigações com objetivo de melhor entender o seu comportamento estrutural.

3 INVESTIGAÇÃO EXPERIMENTAL

3.1 Propriedades dos Materiais

• Betão

Nas juntas entre blocos cerâmicos, de aproximadamente 25 mm de espessura, e na camada de compressão do elemento de alvenaria (cerca de 30 mm de espessura) utilizou-se um betão com resistência média à compressão de 45 MPa. Dada a pequena espessura das juntas e da camada de compressão, adoptou-se um inerte britado de 10 mm de diâmetro máximo. Após a homogeneização das misturas foram realizados ensaios de trabalhabilidade tendo-se obtido 160 mm de abaixamento para o betão das juntas e 85 mm para o betão da camada de compressão. Estes valores de abaixamento mostraram-se adequados ao tipo de betonagem, dada a facilidade de preenchimento dos espaços sem terem ocorrido defeitos no betão.

• Tijolos Cerâmicos

Foram realizados ensaios de resistência à compressão nos blocos, na direcção paralela aos furos e na direcção perpendicular aos furos. As faces de aplicação da carga foram regularizadas por desgaste. Para cada direcção do tijolo foram realizados oito ensaios, segundo as recomendações da Norma Europeia EN 772-1, ver Figuras 5 e 6. A resistência média à compressão foi de 100 MPa para a direcção paralela aos furos e de 50 MPa na direcção perpendicular aos furos.



Figura 5. Ensaio de compressão no tijolo, com carga aplicada na direcção paralela aos furos.



Figura 6. Ensaio de compressão no tijolo, com carga aplicada na direcção perpendicular aos furos.

Segundo Almeida (2002), a resistência média à tracção foi de 4,32 MPa para a direcção paralela aos furos e de 2,86 MPa na direcção perpendicular aos furos.

• Laminados de Fibras de Carbono - CFRP:

No reforço foram utilizados laminados de fibras de carbono – CFRP, de secção transversal igual a 9.59 ± 0.09 mm de largura e 1.45 ± 0.005 mm de espessura. Com base nos resultados obtidos em ensaios de tracção uniaxial, Figura 7, realizados por Cruz *et al.*, 2001, segundo as recomendações da ISO 527-5:1997, verificou-se que o valor médio do módulo de Young, da resistência à tracção e da extensão destes laminados foi de 158 GPa, 2700 MPa e 17,0 %, respectivamente.

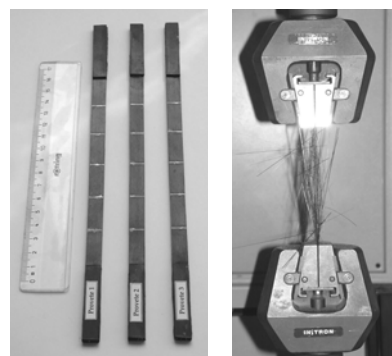


Figura 7 – Provetes de laminados de CFRP (esquerda) e rotura típica dos laminados em ensaio de tracção.

3.2 Características dos Elementos de Casca

Por motivo de simplificação do processo construtivo dos elementos de casca, optou-se pela utilização de elementos planos. Além disto estes elementos de casca são representativos do comportamento à flexão de uma parcela reduzida de uma casca abatida. Foram construídos nove elementos com as dimensões apresentadas na Figura 8. Os elementos foram distribuídos em três grupos de três exemplares. O primeiro foi composto pelos modelos de referência (P1, P2 e P3), o segundo pelos reforçados segundo a técnica de colagem dos laminados de CFRP sobre a superfície do betão (P4, P5 e P6) e o terceiro pelos provetes reforçados segundo a técnica de inserção dos laminados em entalhes executados no betão (P7, P8 e P9).

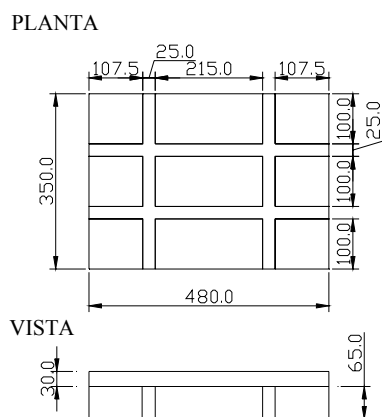


Figura 8. Dimensões dos elementos de casca [mm].

3.3 Técnicas de Reforço

• CFRP colado na superfície do betão

Segundo Fortes *et al.* (2002), a aplicação desta técnica é dividida em diversas etapas: preparação da superfície do betão (substrato) utilizando-se disco de desbaste, para retirada da nata de cimento e nivelamento da superfície; utilizando-se um ponteiro criou-se uma pequena rugosidade na superfície do betão, com a finalidade de melhorar a aderência entre adesivo e substrato; limpeza dos laminados utilizando-se acetona; limpeza das superfícies do betão pela aplicação de jacto de ar; mistura dos dois componentes do adesivo epoxídico; aplicação do adesivo sobre as superfícies do laminado e do betão; aplicação do laminado sobre a superfície do betão, entre apoios; aplicação de uma pequena pressão, utilizando-se um rolo de borracha, com a finalidade de evitar vazios, retirando-se o excedente de adesivo. Após 24 horas foi possível realizar uma vistoria aos reforços, por auscultação, tendo-se comprovado a efectiva colagem de todo o laminado (ver Figura 9).



Figura 9. Elementos de casca reforçados com laminados colados na superfície do betão.

• CFRP inserido no betão de recobrimento

Esta técnica difere da anterior apenas pelo posicionamento do reforço. Neste caso foram realizados entalhes no betão das juntas, com cerca de 4 mm de largura por 12 mm de altura, onde foi aplicado o adesivo e inserido o laminado (ver Figura 10).



Figura 10. Realização de entalhes no betão.

Esta técnica possui algumas vantagens sobre a anterior, designadamente: dupla superfície de contacto do laminado; não é necessário preparar a superfície do substrato de betão; maior mobilização da capacidade resistente do laminado; evita-se o aumento de secção do elemento reforçado; maior resistência ao fogo e actos de vandalismo.

3.4 Equipamentos e Procedimentos de Ensaio

Para realização dos ensaios foi utilizado um pórtico metálico de reacção, onde estava fixado o actuador hidráulico, que aplicava o carregamento nos elementos de casca em resposta ao comando emitido pelo sistema de controlo do ensaio. Devido às dimensões dos elementos optou-se pela realização de ensaios sob três pontos de carga, sendo a distância entre apoios de 420 mm e a carga aplicada a meio vão.

Os ensaios foram realizados sob controlo de deslocamento, segundo uma velocidade de aproximadamente 5 $\mu\text{m/s}$, até ser alcançada a rotura dos elementos. Os deslocamentos foram obtidos por intermédio da leitura de dois transdutores de deslocamentos lineares - LVDTs, ligados ao sistema de aquisição de dados, posicionados a meio vão dos elementos, ver Figura 11. Os resultados apresentados na secção 4 deste trabalho estão baseados na média dos resultados registados nos dois transdutores, considerando-se que não ocorreu diferença significativa entre as leituras.

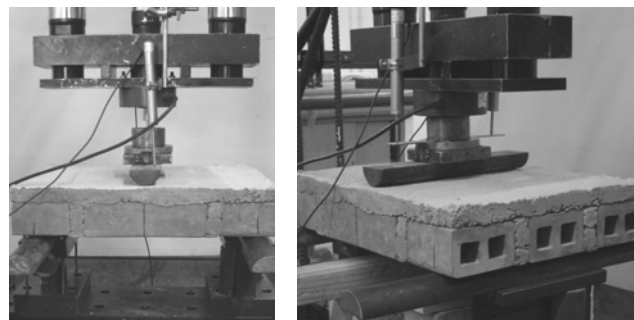


Figura 11. Esquema do ensaio.

4 APRESENTAÇÃO E ANÁLISE DOS RESULTADOS

4.1 Modos de Rotura

Os provetes de referência apresentaram rotura do tipo frágil, típica dos materiais utilizados (cerâmica e betão simples) submetidos a esforços de flexão. O processo de rotura dos elementos iniciou-se com a quebra da ligação entre betão e blocos cerâmicos, na região das juntas, seguido pela propagação das fendas pelo betão da camada de compressão, até ocorrer a rotura completa dos elementos, conforme ilustra a Figura 12.

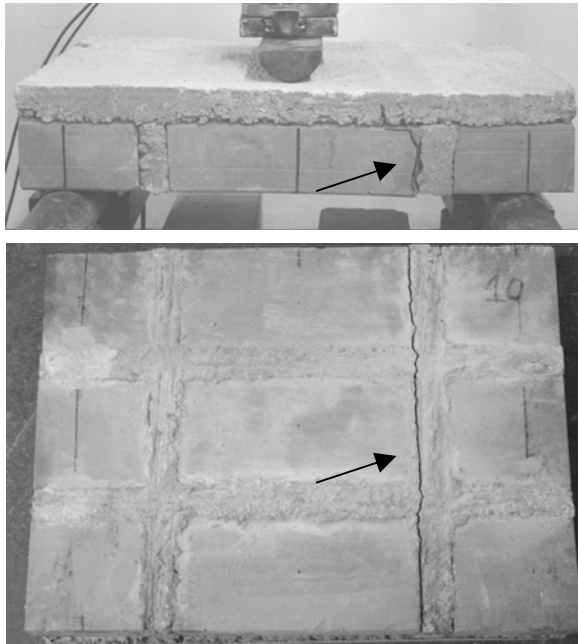


Figura 12. Típico modo de rotura dos elementos de referência.

O processo de rotura dos elementos reforçados por meio de laminados colados na superfície do betão iniciou-se pela abertura de fenda na região do bloco cerâmico, entre as juntas de betão, seguido pela propagação da fenda na região do betão da camada de compressão até ao destacamento do laminado, ver Figuras 13 e 14.

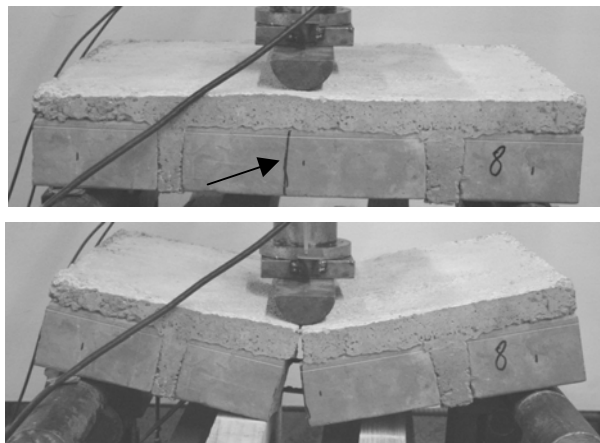


Figura 13. Típico modo de rotura dos elementos reforçados com laminados colados.

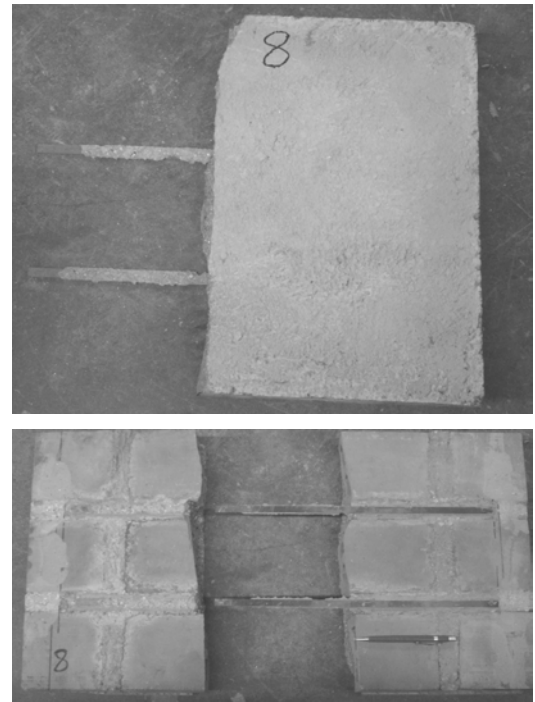


Figura 14. Elementos reforçados com laminados colados, após a rotura.

O processo de rotura dos elementos reforçados com laminado inserido no betão também iniciou-se pela abertura de fenda na região do bloco cerâmico da fiada central. No entanto, com o acréscimo de carga, surgiu outra fenda na ligação entre o betão e o bloco, que se propagou até à camada de compressão. Devido à presença do laminado, a fenda propagou-se com uma certa inclinação. A rotura do elemento ocorreu sempre próxima da região de ancoragem dos laminados, ver Figuras 15 e 16.

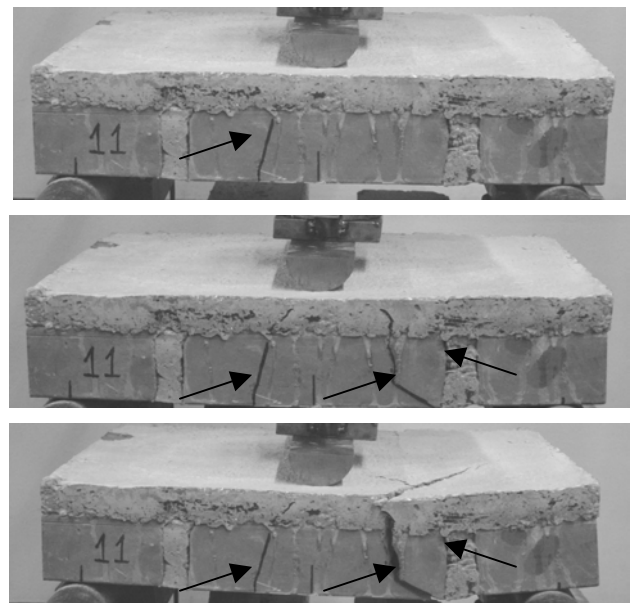


Figura 15. Típico modo de rotura dos elementos reforçados com laminados inseridos no betão.

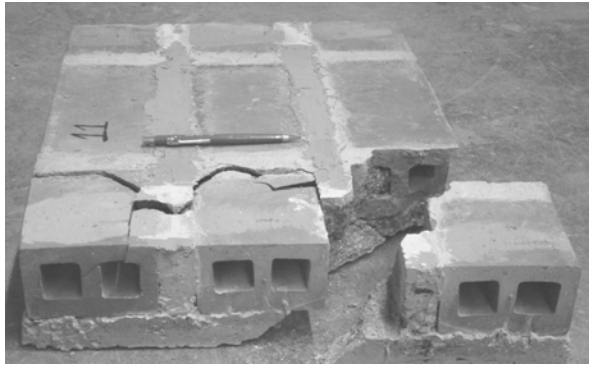
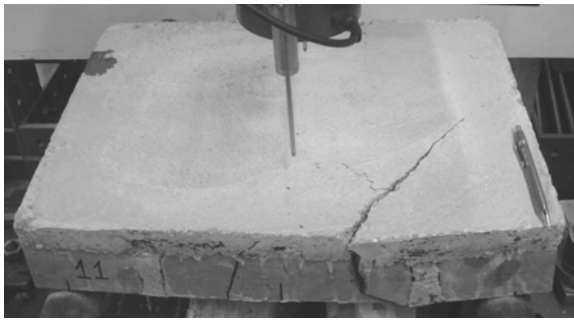


Figura 16. Elementos reforçados com laminados inseridos no betão, após a rotura.

4.2 Carga e Deslocamento de Rotura

Os elementos reforçados segundo as duas técnicas propostas obtiveram carga de rotura superior aos modelos de referência. As flechas a meio vão dos elementos de referência foram ligeiramente inferiores às dos elementos reforçados segundo a técnica de colagem dos laminados sobre a superfície do betão. Já a técnica de inserção dos laminados em entalhes executados no betão de recobrimento alcançou a carga máxima com deslocamento significativamente superior aos deslocamentos registados, quer nos elementos de referência, quer nos reforçados segundo a técnica de colagem do CFRP sobre a superfície do betão, ver Tabela 1 e Figuras 17 a 20.

Tabela 1. Cargas e flechas a meio vão, na rotura.

Tipo	Provete	Carga (kN)	Flecha (mm)
Modelo de referência	P1	13.01	1.16
	P2	17.73	1.34
	P3	19.97	2.05
Laminado colado na superfície	P4	30.29	2.36
	P5	29.94	1.69
	P6	37.25	2.21
Laminado inserido	P7	36.12	4.60
	P8	34.55	3.96
	P9	32.53	3.93

4.3 Resposta Carga vs. Deslocamento Vertical

Antes do início da fendilhação, todos os painéis apresentaram comportamento semelhante. No entanto, após a carga de fendilhação foi observado um acréscimo de rigidez dos elementos reforçados com laminados inseridos (ver Figura 20).

Os elementos reforçados com laminados inseridos desenvolveram uma certa ductilidade para níveis de flecha superiores às flechas de rotura dos elementos das outras séries, comportamento este de importância relevante na segurança. Na rotura estes elementos alcançaram uma flecha aproximadamente dupla dos restantes, ver Figuras 17 a 20. De notar que os LVDTs registaram deslocamentos de ajuste do sistema de aplicação de carga, conduzindo a uma resposta carga vs. deslocamento menos rígida na fase

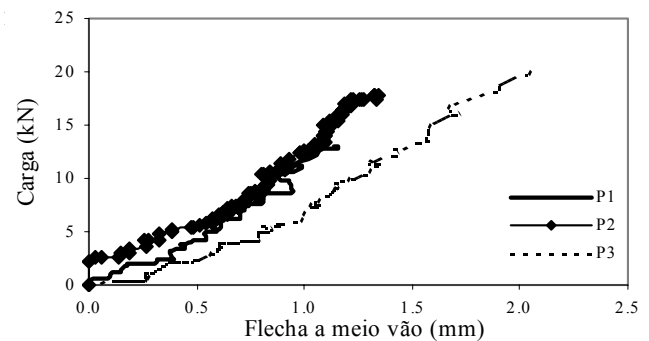


Figura 17. Carga vs. deslocamento a meio vão – elementos de referência.

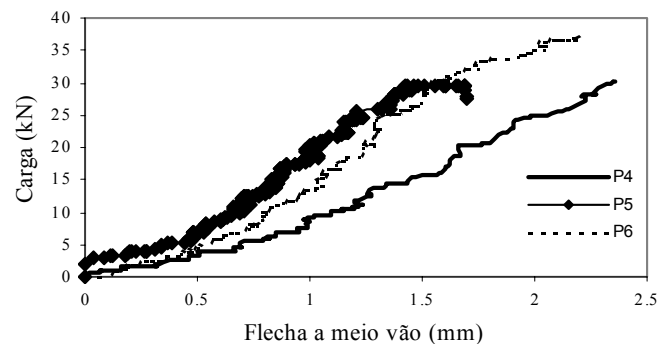


Figura 18. Carga vs. deslocamento a meio vão – elementos reforçados com CFRP colado na superfície.

Da análise das respostas incluídas na Figura 19, e por comparação com as respostas nos painéis das outras séries, verifica-se que aquelas são mais uniformes, revelador de que o sistema de reforço com laminados cravados assegura um comportamento com maior fiabilidade.

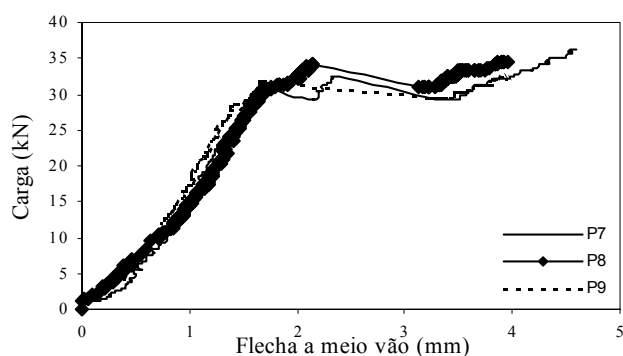


Figura 19. Carga vs. deslocamento a meio vão – elementos reforçados com CFRP inseridos

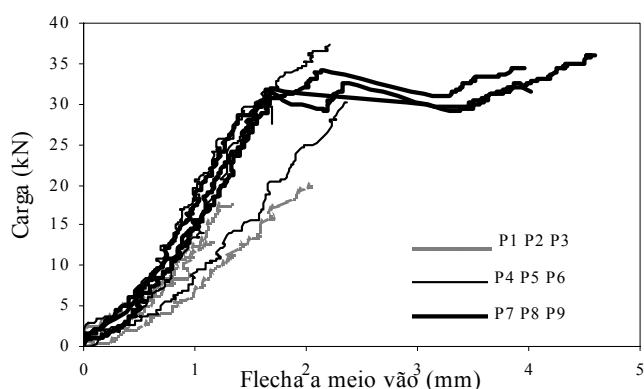


Figura 20. Carga vs. deslocamento a meio vão – todos os elementos.

A Figura 21 ilustra a pequena dispersão dos resultados de cargas e deslocamentos no instante da rotura, considerando-se que vários parâmetros interferem nos resultados dos ensaios, entre eles: propriedades físicas e mecânicas dos materiais, forma dos blocos, dimensão e configuração das juntas, espessura da camada de compressão, controlo da qualidade na execução dos elementos, cura do betão e procedimentos de ensaio. Pode-se observar, ainda, o expressivo aumento de deformação alcançado com a utilização da técnica de reforço por inserção dos laminados no betão.

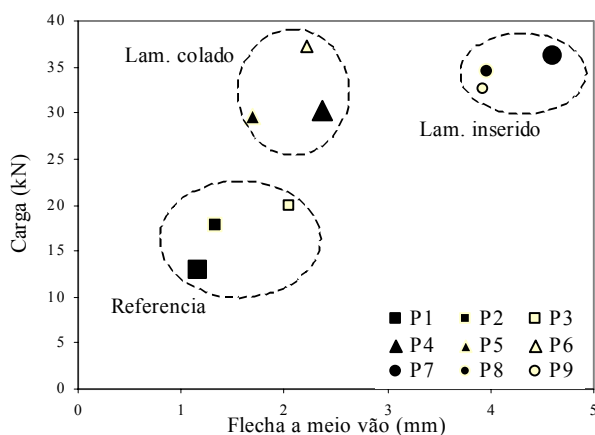


Figura 21. Carga vs. deslocamento na rotura – todos os elementos ensaiados

5 CONCLUSÕES

As duas técnicas de reforço são aplicáveis ao tipo de estrutura objecto deste estudo, conseguindo alcançar, em média, praticamente o dobro da carga de referência. No entanto, a técnica de inserção dos laminados de CFRP em entalhes realizados no betão é mais eficaz, alcançando, na rotura, deformações significativamente maiores que a técnica de colagem do reforço sobre a superfície do betão.

A facilidade e rapidez de aplicação das técnicas de reforço apresentadas neste trabalho são factores importantes para sua adopção. Além disto, a técnica de inserção do laminado permite garantir manutenção da secção original, factor de fundamental importância em edificações históricas e de cunho religioso.

6 AGRADECIMENTOS

Agradecemos ao Departamento de Engenharia Civil da Universidade do Minho, PT; à Bettor - MBT; à Coordenação de Aperfeiçoamento de pessoal de Nível Superior-CAPES, BR e a Fundação para Ciência e Tecnologia- FCT, PT.

7 REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- International Federation For Structural Concrete (fib). *Externally bonded FRP reinforcement for RC structures* CEB-FIP - grupo de trabalho 9.3, 2001.
- M. R. Valluzzi; C. Modena. *Experimental Analysis and Modelling of Masonry Vaults Strengthened by FRP*, Seminar of Historical Constructions Possibilities of Numerical and Experimental Techniques, 627-935, 2001.
- EN 772-1, Norma Europeia para Métodos de Ensaio de Blocos para Alvenaria - Parte 1: Determinação da Resistência à Compressão. Junho, 2000.
- C. Almeida. *Characterization of Brick and Brick Mortar Interface Under Uniaxial Tension*. VII International Seminar on Structural Masonry for Developing Countries. 2002.
- CRUZ, J.S. M., BARROS, J.A.O., FARIA, R., “*Assessing the embedded length of epoxy-bonded carbon laminates by pull-out bending tests*”, International Conference Composites in Construction, pp. 217-222, 10-12 October 2001.
- Fortes, A. S., Padaratz I. J. e Barros J. A. O. de, *Projeto de Reforço à Flexão com FRP Baseado nas Recomendações do ACI 440, Jornadas Sul-Americanas de Engenharia Estrutural, TRB0307, 2002.*